

FESTIGKEIT UND VERFORMUNG VON LEICHTZUSCHLAG BEI TIEFEN TEMPERATUREN

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy
Dipl.-Ing. U. Pusch

Februar 1989

Mit Hilfe von Forschungsmitteln der Fa. Lias-Franken-Leichtbaustoffe
wurde diese Arbeit in dankenswerter Weise gefördert.

INHALTSVERZEICHNIS

Festigkeit und Verformung von Leichtzuschlag bei tiefen Temperaturen

	Seite
1. Einführung und Versuchsprogramm	3
2. Wasseraufnahme	4
3. Porenradienverteilung vor und nach Tieftemperaturzyklen	5
4. Kornfestigkeit bei tiefen Temperaturen	8
5. Thermisches Dehnverhalten bei tiefen Temperaturen	10
6. Deutung der Versuchsergebnisse	11
7. Empfehlungen für die Praxis	13
8. Zusammenfassung	14
9. Literatur	16

1. EINFÜHRUNG UND VERSUCHSPROGRAMM

Die internationale Entwicklung zeigt, daß sich für den Bau von LNG-Behältern die Spannbetonbauweise durchsetzen wird. Sie verfügt in Störfällen über eine hohe Rißzähigkeit und damit über ein überlegenes Sicherheitspotential. Die Anwendung von Spannbeton bei tiefen Temperaturen von rd. $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ machte in den letzten Jahren zahlreiche Tieftemperaturuntersuchungen an Einzelbaustoffen sowie an Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen erforderlich. Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz an der TU Braunschweig konzentrierten sich in jüngster Zeit die Untersuchungen auf die Tieftemperaturanwendung von Konstruktionsleichtbeton.

Die wesentlichen Vorteile von Konstruktionsleichtbeton für den Bau von LNG-Behältern sind:

- Gewichtseinsparungen infolge geringerer Rohdichte gegenüber Normalbeton
- thermisch trägere Masse gegenüber Normalbeton infolge geringerer Wärmeleitfähigkeit
- Erzeugung geringerer Zwangsspannungen gegenüber Normalbeton infolge kleinerer Wärmeleitfähigkeit, Temperaturdehnzahl und niedrigeren Elastizitätsmoduls

Die Untersuchungen haben ergeben, daß der verwendete Leichtzuschlag, insbesondere seine Kernfeuchte, die Materialeigenschaften von Konstruktionsleichtbeton bei tiefen Temperaturen mitbestimmt [1]. Zur Herstellung des für LNG-Behälter sehr geeigneten Konstruktionsleichtbetons der Güte LB 45 wurden einheitlich Liapor-Sand K 0/4 und die Korngruppen 4/8, 8/16 der Güte Liapor 7 verwendet. Im vorliegenden Beitrag werden aus diesem Grunde ausschließlich die Leichtzuschläge der Korngruppen 4/8 und 8/16 der Güte Liapor 7 behandelt.

Es ist das Ziel der Untersuchungen, das Festigkeits- und Verformungsverhalten des "Einzelbaustoffs" Leichtzuschlag bei tiefen Temperaturen zu klären. Das Versuchsprogramm läßt sich wie folgt zusammenfassen: Bestimmung der Wasseraufnahme bei Wasserlagerung in Abhängigkeit von der Zeit, Ermittlung der Porenradienverteilung vor und nach Tieftemperaturzyklen, Bestimmung der

Kornfestigkeit und des thermischen Dehnverhaltens der Leichtzuschläge bei tiefen Temperaturen. Kornfestigkeit, thermisches Dehnverhalten und Porenradialverteilung nach Tieftemperaturzyklen werden an unterschiedlich vorbehandelten Leichtzuschlägen untersucht. Die Versuchsparameter sind "ofentrocken, vorgefeuchtet und wassersatt".

Der Beitrag soll u. a. helfen, die richtige Wahl der Vorbehandlung (Vorfeuchtung) der Leichtzuschläge für die Herstellung von Konstruktionsleichtbeton für den Bau von LNG-Behältern zu treffen.

2. WASSERAUFNAHME

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme vollständig ausgetrockneter Leichtzuschläge wurden unter Wasser gelagerte Leichtzuschläge zu ausgewählten Zeiten bis zur Gewichtskonstanz bei +105 °C getrocknet. Die Wasseraufnahme ergibt sich aus der Beziehung

$$\Delta W = \frac{G_f(t) - G_{tr}}{G_{tr}} \cdot 100 \quad [\text{Masse -\%}]$$

$G_f(t)$ = Feuchtgewicht zum Zeitpunkt t

G_{tr} = Trockengewicht nach vollständiger Austrocknung

Die Untersuchung erfolgte gesondert für die Korngruppen 4/8 und 8/16. Im Bild 1 ist die Entwicklung der Kernfeuchte in Abhängigkeit von der Zeit der Wasserlagerung aufgetragen. Nach ca. ein- bis zweitägiger Wasserlagerung sind nahezu 50 % der Wassermenge des gesättigten Korns aufgenommen. Der Kurvenverlauf der Wasseraufnahme wird mit wachsender Wasserlagerungszeit zunehmend flacher. Die massebezogene Wasseraufnahme der Korngruppe 4/8 ist größer als die Wasseraufnahme der Korngruppe 8/16. Nach 42 Tagen Wasserlagerung wurden die Messungen abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt nahmen beide

Kornfraktionen immer noch Wasser auf. Diese Entwicklung der Wasseraufnahme weist auf die Feinporigkeit des hochfesten Leichtzuschlags der Güte Liapor 7 hin. Es kann davon ausgegangen werden, daß der Wassersättigungsgrad der Leichtzuschläge je nach Korngruppe im Bereich $\Delta W \approx 25$ bis 30 % liegt.

Zusätzlich ist im Bild 1 die bei einer 30-minütigen Wasserlagerung aufgesaugte Wassermenge W30 aufgetragen sowie der Bereich der Wasseraufnahme, der bei natürlicher Haldenlagerung (Vorfeuchtung) von Leichtzuschlägen zu erwarten ist. Die Wassermenge W30 beträgt unabhängig von der Korngruppe ca. 5 bis 7 %; die Wasseraufnahme, die bei natürlicher Haldenlagerung wesentlich von den Lagerungs- und Witterungsbedingungen abhängt, liegt nach praktischen Erfahrungen im Bereich $\Delta W \approx 8$ bis 15 %. Zur Nachbildung der Feuchte bei Haldenlagerung wurden die Zuschläge in den Versuchen 3 Stunden unter Wasser gelagert und anschließend ausgetrocknet. Die Wasseraufnahme betrug i.M. ca. 9 % (Vorfeuchtung).

3. PORENRADIENVERTEILUNG VOR UND NACH TIEFTEMPERATURZYKLEN

Die Porenradienverteilung der Leichtzuschläge Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16 wird mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt. Die Meßmethode erfaßt Porenradien der Größe 10^{-5} bis 10^{-9} m. Es wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt: Porenradienverteilung des Gesamtkorns und des Kerns gesondert für beide Korngruppen; Porenradienverteilung des Gesamtkorns nach Tieftemperaturzyklen, die wiederum für die beiden Fraktionen gesondert bestimmt wurde. Bei Betrachtung der äußeren Struktur fällt bei beiden Korngruppen die rot-braun-farbene Sinterschicht als Schale auf. Die Leichtzuschläge der Korngruppe 4/8 haben eine gleichmäßige Kugelform mit einer äußerlich geschlossenen Oberfläche. Die Zuschläge der Korngruppe 8/16 weisen dagegen deutliche Einbrüche und Abplatzungen an der gesinterten Schale auf. Diese Beschädigungen der äußeren Schale werden auf Grund ihrer großen "Porenradien" von der Quecksilberporosimetrie nicht erfaßt.

Das Bild 2 zeigt die integrale und differentiale Porenradienverteilung des Gesamtkorns von Leichtzuschlag Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16. Der Verlauf der Meßwerte der differentialen Porenradienverteilung hat zwei Maxima: Das erste Maximum bei einem Porenradius von ca. $0,5 \cdot 10^{-6}$ m, das zweite Maximum bei einem Radius von ca. $0,1 \cdot 10^{-6}$ m. Dies weist auf die heterogene Struktur der Leichtzuschläge hin. Das erste Maximum charakterisiert die Schalenstruktur der Leichtzuschläge. Es fällt bei der Korngruppe 4/8 wesentlich größer aus als bei der Korngruppe 8/16. Dies ist auf den größeren Volumenanteil der Schale am Gesamtvolumen (Kern + Schale) des Korns der Fraktion 4/8 gegenüber der Fraktion 8/16 zurückzuführen. Entsprechend ist auch das differentiale Porenvolumen der Schale der Korngruppe 4/8 größer als das der Korngruppe 8/16. Das zweite Maximum kennzeichnet den Kern der Leichtzuschläge. Hier übertrifft das differentiale Porenvolumen der Zuschläge 8/16 das Porenvolumen der Zuschläge 4/8; der Anteil des Kernvolumens am Gesamtvolumen ist bei der Fraktion 4/8 kleiner als bei der Fraktion 8/16. Das integrale Porenvolumen der Fraktion 4/8 ist geringfügig größer als das der Fraktion 8/16.

Zur Messung der Porenradienverteilung des Zuschlagkerns wurden aus der Kugelform beider Fraktionen durch Sägen Würfel hergestellt, die ausschließlich aus Kernmaterial bestanden. Die Zuschlagproben der Korngruppe 8/16 bzw. 4/8 waren Würfel mit der Kantenlänge von ca. 8 mm bzw. ca. 4 mm. Im Bild 3 ist das Meßergebnis der Porenradienverteilung für das Kernmaterial dargestellt. Das zuvor beschriebene erste Maximum, das die Schalenstruktur beschreibt, existiert nicht mehr. Dies bestätigt die Richtigkeit der Interpretation von Bild 2. Darüber hinaus verdeutlicht das Bild 3, daß die Porenstruktur des Kernmaterials beider Korngruppen einheitlich aufgebaut ist. Der Versuch, die Porenradienverteilung der äußeren Schale allein zu bestimmen, scheiterte an der Präparation nicht ausreichend großer Schalenproben aus einem relativ festen Leichtzuschlagkorn (Liapor 7).

Die Porenradienverteilung der Leichtzuschlagkörner Liapor 7 läßt sich wie folgt zusammenfassen: Die äußere Schale enthält im Vergleich zum Kernmaterial einen beträchtlichen Anteil an Porenvolumen. Das Porenvolumen in der Schale setzt sich aus relativ wenigen Poren mit größerem Poreradius zusammen. Die Poren sind vermutlich Mikrobeschädigungen der äußerlich unbeschädigt und geschlossen erscheinenden Sinterschicht. Das Kernmaterial ist da-

gegen fein porös. Zur Klärung der Kornstruktur, insbesondere der Schalenstruktur, sind weitere Untersuchungen unbedingt erforderlich.

Um Strukturveränderungen bzw. Gefügezerstörungen infolge von Tieftemperaturzyklen aufzeigen zu können, wurde die Porenradienverteilung des Leichtzuschlags im Anschluß an die Temperaturbeanspruchung bei Raumtemperatur im Quecksilberdruckporosimeter bestimmt. Es wurden 5 Tieftemperaturzyklen mit den Amplituden $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ gewählt. Nach den Untersuchungen des thermischen Dehnverhaltens von Leichtzuschlag bei TT (s. Abschn. 5) kann davon ausgegangen werden, daß der innere Zerstörungsprozeß nach einer Abkühlung auf ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ weitgehend abgeschlossen ist. Bei weiterer Abkühlung findet nur noch eine Festkörperkontraktion statt. Die zyklische Abkühlung auf $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt daher reichlich auf der sicheren Seite.

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Porenradienverteilung ofentrockener und vorgefeuchteter Leichtzuschläge der Korngruppen 4/8 und 8/16 (Gesamtkorn) im Anschluß an die zyklische Tieftemperaturbeanspruchung. Der Vergleich mit Bild 2 verdeutlicht, daß die Porenradienverteilung nach Tieftemperaturzyklen bei Ofentrocknung und Vorfeuchtung der Leichtzuschläge weitgehend der Porenradienverteilung der nicht vorbeanspruchten Leichtzuschläge entspricht. Eine Gefügezerstörung infolge Tieftemperaturzyklen wäre in der Porenradienverteilung an einer Verschiebung der Maxima des Porenvolumens zu größeren Porenradien hin zu erkennen gewesen. In gleicher Weise wurden auch wassersatte Leichtzuschläge beider Korngruppen Tieftemperaturzyklen ausgesetzt. Nach der Entnahme der Proben aus der Kältekammer wurde festgestellt, daß ein großer Anteil der Zuschlagproben beider Korngruppen Beschädigungen der Kornschale und Abplatzungen aufwies. Z. T. waren die Zuschlagproben völlig auseinandergefallen. Die Durchführung einer Quecksilberdruckporosimetrie an den beschädigten Leichtzuschlägen bzw. an den Bruchstücken erübrigte sich damit.

4. KORNFESTIGKEIT

Die Druckfestigkeit von Leichtbeton wird durch die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Zuschlagkorn und Mörtelgerüst sowie von den Bindekräften zwischen beiden bestimmt. Das Verhältnis der E-Moduli von Zuschlag und Mörtel entscheidet wesentlich die Kräfteverteilung zwischen Zuschlagkorn und Mörtel in einer druckbeanspruchten Leichtbetonprobe. Den entwerfenden Ingenieur interessiert u. a. der Einfluß der Zuschlageigenfestigkeit auf die Leichtbetondruckfestigkeit. In der Vergangenheit wurden schon einige Versuche unternommen, offene Fragen zu diesem Thema zu klären [3, 4, 6]. Es sind i. w. die drei folgenden Methoden zur Bestimmung der Kornfestigkeit zu unterscheiden: Untersuchung des Einzelkorns, Untersuchung der Kornschüttung, Untersuchung des Zweistoffmodells "Matrix-Zuschlag". Die Untersuchung des Einzelkorns ist versuchstechnisch aufwendig. Darüber hinaus streuen die Meßwerte in einem weiten Bereich [6]. Der Nachteil der Untersuchungen des Zweistoffmodells liegt in der problematischen Auswertung der Versuchsergebnisse. Als Vorteil der Kornschüttungsuntersuchung sind die versuchstechnisch einfache Handhabung sowie die relativ geringe Streuung der Versuchsergebnisse zu nennen. Die DIN 4226 schreibt im Teil 3, Abschnitt 7.2 vor, die Kornfestigkeit am Schüttgut im Druckzylinderverfahren zu bestimmen. Bei diesem Verfahren wird die Widerstandsfähigkeit des Zuschlagkorns gegen punktförmige Beanspruchung gemessen. Diese Beanspruchung kann nicht uneingeschränkt der Kornfestigkeit gleichgesetzt werden, zumal sich diese Beanspruchung von der eines in der Matrix eingebetteten Zuschlagkorns wesentlich unterscheidet.

Zur Ermittlung der Kornfestigkeitssteigerung infolge tiefer Temperaturen wurde das Druckzylinderverfahren nach DIN 4226 verwendet. Das Bild 6 zeigt den in eine Kältekammer eingebauten Druckzylinder mit dem Wegaufnehmersystem. Die Kornschüttung wird von einem Stahlrohr mit einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Höhe von 100 mm aufgenommen. Die Abmessungen entsprechen damit weitgehend den in der DIN 4226 vorgeschriebenen Abmessungen. Die Zusammendrückung der Kornschüttung wird von einem Quarzglas-Meßsystem in der Kältekammer auf einen induktiven Wegaufnehmer außerhalb der Kältekammer übertragen. Die Eigenverformung des Wegaufnehmersystems infolge Abkühlung

ist damit vernachlässigbar klein. Die Versorgung der Kältekammer erfolgt mit flüssigem Stickstoff als Kühlmittel, der von einem Propeller in der Kammer zerstäubt wird. Die Belastung der Kornschüttung wird nach vollständiger Abkühlung der Probe auf die gewünschte Tieftemperatur aufgebracht. Die Belastungsgeschwindigkeit wird nach DIN 4226 gewählt.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Druckspannung in Abhängigkeit von der prozentualen Zusammendrückung der Kornschüttung bei Temperaturen von +20, -80, -170 °C bei unterschiedlichen Probenfeuchten. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme weisen einen annähernd linearen Anfangsbereich auf. In diesem Belastungsbereich setzt die Zerstörung von Einzelkörnern durch punktförmige Beanspruchung ein. Die Neigung der σ - ε -Linie in diesem Bereich ist ein Maß für die Steifigkeit der Kornschüttung. Mit weiterer Laststeigerung wird die Kornschüttung zunehmend komprimiert; der Verlauf der σ - ε -Linien wird steiler.

Die prozentuale Zusammendrückung der Kornschüttung ist bei Raumtemperatur unabhängig von der Kernfeuchte. Bei tiefen Temperaturen nimmt die Zusammendrückung der vorgefeuchteten und wassersatten Kornschüttung deutlich ab. Die Zusammendrückung ist bei -170 °C kleiner als bei -80 °C. Der Vergleich des Diagramms für die Korngruppe 4/8 mit dem Diagramm für die Korngruppe 8/16 zeigt, daß die prozentuale Zusammendrückung der Korngruppe 4/8 unabhängig von der Temperatur und der Kernfeuchte kleiner ist als die der Korngruppe 8/16. Im Bild 9 ist die auf die Steifigkeit bei Raumtemperatur für ofentrockene Zuschläge bezogene Zuschlagsteifigkeit aufgetragen. Sie ermittelt sich aus der Neigung der Sekante zwischen dem Ursprung und der Grenzspannung, ab der die Komprimierung der Schüttung einsetzt (Bild 7, 8). Der Steifigkeitsgewinn infolge fallender Temperaturen ist nach -80 °C weitgehend abgeschlossen. Er ist abhängig von der Kernfeuchte und der Korngruppe. Der prozentuale Steifigkeitsgewinn infolge tiefer Temperaturen beträgt in den Grenzfällen ca. 140 % bei ofentrockenen Leichtzuschlägen der Korngruppe 8/16 und ca. 260 % bei wassersatten Leichtzuschlägen der Korngruppe 4/8.

5. THERMISCHES DEHNVERHALTEN BEI TIEFEN TEMPERATUREN

Infolge unterschiedlichen thermischen Dehnverhaltens von Leichtzuschlagkorn und Matrix kann es zu Gefügespannungen und Mikrorissen im gefrierenden Konstruktionsleichtbeton kommen. Über das thermische Dehnverhalten von Leichtzuschlagkorn bei tiefen Temperaturen liegen z. Z. noch keine Versuchsergebnisse vor.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde zur Messung des thermischen Dehnverhaltens von Leichtzuschlagkorn ein handelsübliches Tieftemperaturdilatometer der Fa. Linseis (Bild 10) verwendet, das die in der DIN 51 045 geforderten Genauigkeitsvorschriften erfüllt. Die Leichtzuschlagprobe wird am Ende eines Probenaufnahmerohres eingebaut. Ein Taststempel drückt die Probe mit einstellbarer Federkraft gegen das Ende des Probenaufnahmerohres. Taststempel und Probenaufnahmerohr bestehen aus Quarzglas, um die Temperatur-Eigenverformungen auf ein Minimum zu reduzieren. Die Relativverschiebung von Probenaufnahmerohr und Taststempel wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers außerhalb des Kältebereichs gemessen. Das Kühlmittel ist flüssiger Stickstoff. Die Temperaturmessung übernimmt ein PtRh-Pt 10 %-Thermoelement in der Mitte des Rohrofens. Unter Berücksichtigung der relativ kleinen Wärmeleitfähigkeit wurde die Abkühlgeschwindigkeit zu ca. $0,5^{\circ}\text{K/min}$ gewählt. Der mittlere Probendurchmesser der Korngruppe 4/8 betrug ca. 7 mm, der der Korngruppe 8/16 ca. 12 mm. Die äußere Schale der Zuschläge der Korngruppe 4/8 mußte auf Grund der Kugelform mit relativ glatter Oberfläche zur sicheren Lagerung im Wegaufnehmergestänge geringfügig angeschliffen werden.

Bibl. d. TU.
Braunschweig

In den Bildern 11 und 12 ist das mittlere Ergebnis des thermischen Dehnverhaltens von Leichtzuschlagkorn bei tiefen Temperaturen in Abhängigkeit von der Kernfeuchte gesondert für die Korngruppen 4/8 und 8/16 aufgetragen. Es ist beim Vergleich der Versuchsergebnisse zu berücksichtigen, daß die Meßergebnisse z. T. beträchtlichen Streuungen unterworfen sind. Das Versuchsergebnis läßt sich wie folgt zusammenfassen: Das thermische Dehnverhalten von Leichtzuschlagkorn wird wesentlich von seiner Kernfeuchte bestimmt. Die thermischen Dehnungen von ofentrockenem und vorgefeuchtetem

Leichtzuschlag der Korngruppe 4/8 zeigen ein qualitativ ähnliches Verhalten. Die Zuschlagproben erfahren im gesamten Kältebereich Kontraktionen. Die wassersatten Proben dieser Korngruppe expandieren im Temperaturbereich -5 bis -10 °C auf ca. +0,25 ‰. Bei weiterer Abkühlung nimmt die Kontraktion stärker zu als bei den ofentrockenen und vorgefeuchteten Zuschlägen. Die Leichtzuschlagproben der Korngruppe 8/16 neigen gegenüber der Korngruppe 4/8 zu größeren Expansionen im Temperaturbereich -5 bis -10 °C. Die Leichtzuschläge erreichen bei Vorfeuchtung eine maximale Dehnung von ca. +0,15 ‰, bei Wassersättigung ca. +0,75 ‰. Das thermische Dehnverhalten ofentrockener Leichtzuschläge entspricht weitgehend dem der Korngruppe 4/8. Die thermische Dehnung der Leichtzuschläge beträgt nach Abkühlung auf ca. -190 °C je nach Kernfeuchte ca. -0,9 bis -1,5 ‰.

6. DEUTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Im folgenden soll versucht werden, mit Hilfe eines einfachen Porenmodells die Gefriervorgänge im Leichtzuschlagkorn während der Abkühlung zu erklären und damit die Ergebnisse der Tieftemperaturversuche verständlicher zu machen.

Die Poreneinschlüsse im Leichtzuschlagkorn stellen bei Raumtemperatur unabhängig von der Kernfeuchte Schwachstellen im Gefüge dar. Aus diesem Grunde ist die Kornfestigkeit nahezu unabhängig von der Probenfeuchte (Bilder 7, 8).

Im Temperaturbereich +20 °C bis 0 °C zieht sich die Probe bei Abkühlung zusammen, da noch kein Phasenübergang des Wassers stattfindet. Bei weiter fortschreitender Abkühlung gefriert das Wasser zunächst in den größeren Poren. Durch die Eisbildung wird Wasser in benachbarte Luftporen bzw. in nur teilweise gefüllte Poren verdrängt [7]. Ist der Wassergehalt der Leichtzuschlagprobe groß, bzw. existieren nach der Wasserwanderung keine Luftporen mehr in der Nachbarschaft, so ist der Wasserverdrängungsprozeß unterbunden.

Schließlich gefriert auch das Wasser in den feineren Poren. Infolge der Volumenzunahme von 9,1 % beim Phasenübergang Wasser/Eis entstehen große Spannungen, so daß die feuchte Leichtzuschlagprobe eine positive Dehnung erfährt. Dies geschieht bei feuchten und wassersatten Proben im Temperaturbereich $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zum Vergleich sei hier erwähnt, daß der Expansionsvorgang einer feuchten bzw. wassersatten Mörtel- oder Betonprobe im Temperaturbereich von ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ abläuft. Dies ist auf die feinere Porenstruktur von Mörtel und Beton gegenüber der Porenstruktur des Leichtzuschlags zurückzuführen. Die Porenradien von Leichtzuschlag Liapor 7 sind mehr als 10-fach so groß wie die Porenradien von Mörtel und Beton (vgl. Bild 2 mit [7]). Das Wasser in den feinen Poren gefriert erst bei tieferen Temperaturen.

Die Dehnung erreicht ihr Maximum nach dem Expansionsvorgang bei ca. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da die Temperaturdehnzahl von Eis größer ist als die des Zuschlagkorngerüsts, zieht sich das Eis bei weiterer Abkühlung stärker zusammen als das Korngerüst. Die Spannungen im Korngefüge werden vollständig abgebaut. Das thermische Dehnverhalten wird ausschließlich vom Korngerüst bestimmt. Bei weiterer Abkühlung gefriert auch das Wasser in den Feinstporen. Zu inneren Gefügespannungen kommt es allerdings nicht mehr, da die Wasserverdrängung in die Luftspalte zwischen Eis und Porenwände und damit eine Entlastung möglich ist.

Zum Teil wurden im Versuch unterschiedliche Neigungen des Verlaufs der thermischen Dehnung im Temperaturbereich $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermittelt. Andererseits ergab die Korngruppe 8/16 deutlich größere Expansionen als die Korngruppe 4/8. Dies ist i.w. auf zwei Ursachen zurückzuführen: Zum einen wurden die Zuschläge beider Korngruppen vor dem Einbau in das Tieftemperaturdilatometer unterschiedlich präpariert (s. Abschn. 5), zum anderen wurden geringe Verformungen an kleinen Probenlängen (ca. 7 bis 12 mm) ermittelt, was zwangsläufig zu Ungenauigkeiten führen mußte.

Es ist wesentlich, daß das Eis in den Poren der Zuschläge Kräfte aufnehmen kann. Dies führt im Druckzylinderversuch zu kleineren Zusammendrückungen und höheren Steifigkeiten der Leichtzuschlag-Schüttung bei tiefen Temperaturen (Bilder 7 bis 9). Die Widerstandsfähigkeit von feuchtem und wassersattem Zuschlagkorn gegen punktförmige Belastung wird durch tiefe Tempera-

turen erhöht. Die Ursache der größeren Zusammendrückung des Schüttgutes aus der Korngruppe 8/16 gegenüber der Korngruppe 4/8 liegt in der äußeren Beschädigung der Schale der Korngruppe 8/16.

Die Porenradienverteilung nach Tieftemperaturzyklen (Bilder 4, 5) zeigt, daß nennenswerte Gefügeveränderungen in vorgefeuchteten Leichtzuschlägen infolge Eisdruck bei ca. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht zu erwarten sind. Es existieren noch ausreichend viele Luftporen, in die verdrängtes Wasser infolge Eisbildung wandern kann. In wassersatten Leichtzuschlägen werden dagegen wegen fehlender Luftporen so große Gefügespannungen infolge Eisdruck aufgebaut, daß die Kornschalen nach Tieftemperaturzyklen absprengen bzw. die Zuschlagproben z. T. sogar auseinanderfallen.

7. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Die Untersuchungen ergeben, daß das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Leichtzuschlägen bei tiefen Temperaturen wesentlich von der Kernfeuchte bestimmt wird. Das entscheidende Kriterium für die richtige Wahl der Vorfeuchtung der Leichtzuschläge beim Entwurf einer Leichtbetonmischung ist die Forderung nach weitgehender Verträglichkeit der Leichtzuschläge mit der umgebenden Mörtelmatrix bei tiefen Temperaturen. Die Untersuchung des thermischen Dehnverhaltens von Konstruktionsleichtbeton bei tiefen Temperaturen hat ergeben, daß die Expansion bzw. Gefügeveränderung infolge Eisbildung mit zunehmender Kornfeuchte der verwendeten Leichtzuschläge wächst [1]. Aus diesem Grunde sollten Leichtzuschläge möglichst geringer Kernfeuchtigkeit eingebaut werden. Nach den ersten vorliegenden Versuchsergebnissen ist die maximale Vorfeuchtung von Leichtzuschlägen der Güte Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16 auf ca. 8 % (Kernfeuchte) zu beschränken.

Es ist zu empfehlen, entsprechende Tieftemperaturuntersuchungen auch an Leichtzuschlägen der Güte Liapor 8 durchzuführen. Im Vergleich zu Liapor 7 sind noch feinere Zuschlagporen zu erwarten. Der Expansionsvorgang feuchterer Leichtzuschläge der Güte Liapor 8 wird vermutlich zu tieferen Tempe-

raturen hin verschoben. Dieses Verhalten würde die Verträglichkeit der Leichtzuschläge mit der Mörtelmatrix bei tiefen Temperaturen und damit die Eignung von Konstruktionsleichtbeton für den LNG-Behälterbau noch zusätzlich verbessern. Zur Klärung dieser Fragen sind noch weitere Untersuchungen unbedingt erforderlich.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Der Konstruktionsleichtbeton ist ein für den Bau von LNG-Behältern geeigneter Baustoff. Frühere Untersuchungen haben ergeben, daß die Kernfeuchte der verwendeten Leichtzuschläge das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Konstruktionsleichtbeton bei tiefen Temperaturen wesentlich mitbestimmt. Um nähere Aufschlüsse hierzu zu erhalten, werden in der vorliegenden Forschungsarbeit die Wasseraufnahme, die Porenradienverteilung vor und nach Tieftemperaturzyklen, die Kornfestigkeit und das thermische Dehnverhalten der Leichtzuschläge Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16 bei tiefen Temperaturen untersucht.

Im folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengestellt:

1. Die Zuschläge von Liapor 7 nehmen nach ca. ein- bis zweitägiger Wasserlagerung nahezu 50 % der Wassersättigungsmenge auf.
2. Nach ca. 40-tägiger Wasserlagerung ist die vollständige Sättigung der Zuschläge noch nicht erreicht.
3. Die massebezogene Wasseraufnahme der Korngruppe 4/8 ist geringfügig größer als die der Korngruppe 8/16.
4. Die am Gesamtkorn gemessene Porenradienverteilung weist zwei Maxima der Porenvolumen auf. Das erste Maximum bei dem größeren Porenradius charakterisiert die Schalenstruktur, das zweite Maximum bei dem kleineren Porenradius die Kernstruktur.

5. Das Porenvolumen der Schale setzt sich aus relativ wenigen Poren mit einem größeren Porenradius zusammen. Der Kern ist dagegen feinporös.
6. Das thermische Dehnverhalten der Leichtzuschläge wird bei tiefen Temperaturen wesentlich von der Kernfeuchte bestimmt.
7. Bei vorgefeuchteten bis wassersatten Leichtzuschlägen treten im Temperaturbereich -5 bis -10 °C Expansionen bzw. positive Dehnungen infolge Eisdruck auf.
8. Die Expansion ist umso größer, je höher die Kernfeuchte des Zuschlags ist.
9. Die Messungen der Porenradienverteilung im Anschluß an 5 Tieftemperaturzyklen zeigen, daß sich die Porenstruktur ofentrockener und vorgefeuchteter Leichtzuschläge infolge zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung nur unwesentlich ändert.
10. In wassersatten Leichtzuschlägen treten beim Gefrierprozeß infolge Eisdruck in den Poren sehr hohe Gefügespannungen auf. Infolge zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung sprengt die Schale der Leichtzuschläge ab; z. T. brechen die Leichtzuschläge auch völlig auseinander.
11. Die Kornfestigkeit der Leichtzuschläge nimmt bei tiefen Temperaturen zu.
12. Die Zunahme der Kornfestigkeit infolge tiefer Temperaturen ist umso größer, je feuchter das Zuschlagkorn ist.
13. Die Festigkeitssteigerung ist u. a. auf die Tatsache zurückzuführen, daß das Eis in den Poren Kräfte übertragen kann.
14. Nach ersten Leichtzuschlaguntersuchungen bei tiefen Temperaturen wird empfohlen, bei Verwendung von Liapor 7 zur Herstellung von Konstruktionsleichtbeton für den LNG-Behälterbau die Kernfeuchte der Leichtzuschläge auf ca. 8 % zu beschränken.

9. LITERATUR

- [1] Rostásy, F. S.; Pusch, U.: Strength and deformation of lightweight concrete of variable moisture content at very low temperatures
The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 9, Number 1, February 1987
- [2] DIN 4226 Teil 3: Zuschlag für Beton; Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge; April 1983
- [3] Schmidt-Hurtienne, K.-D.: Ein Beitrag zur Frage der Prüfung von Zuschlägen und der Vorausbestimmung der Druckfestigkeit von Leichtbeton
Dissertation, TU Braunschweig, 1972
- [4] Meyer, Chr.: Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit der groben Leichtzuschlag-Körner und deren Einfluß auf die Druck- und Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton
Dissertation, TU Hannover, 1974
- [5] Neisecke, J.; Schlothfeldt, P. †: Einfluß der Leichtzuschlag-Oberfläche auf Festigkeit und Feuchtigkeitshaushalt von Leichtbeton
Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, 22/23, 1982/83, S. 34
- [6] Müller-Rocholz, J.: Einfluß von Leichtzuschlageigenschaften auf die Leichtbetondruckfestigkeit
Dissertation, TH Aachen, 1978
- [7] Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton
Dissertation, TU Braunschweig, 1982

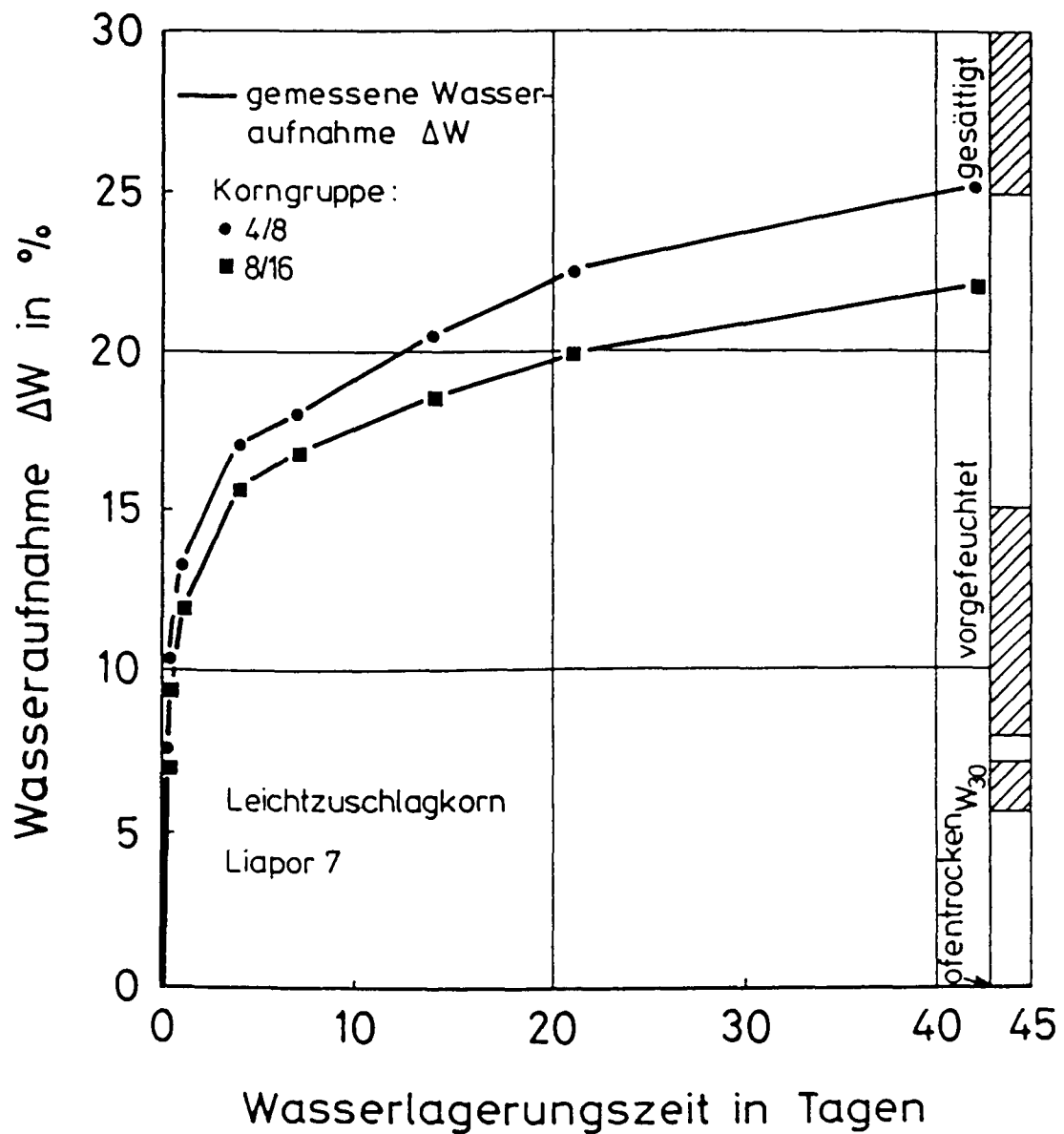


Bild 1: Wasseraufnahme von Leichtzuschlag Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16 in Abhängigkeit von der Wasserlagerungszeit

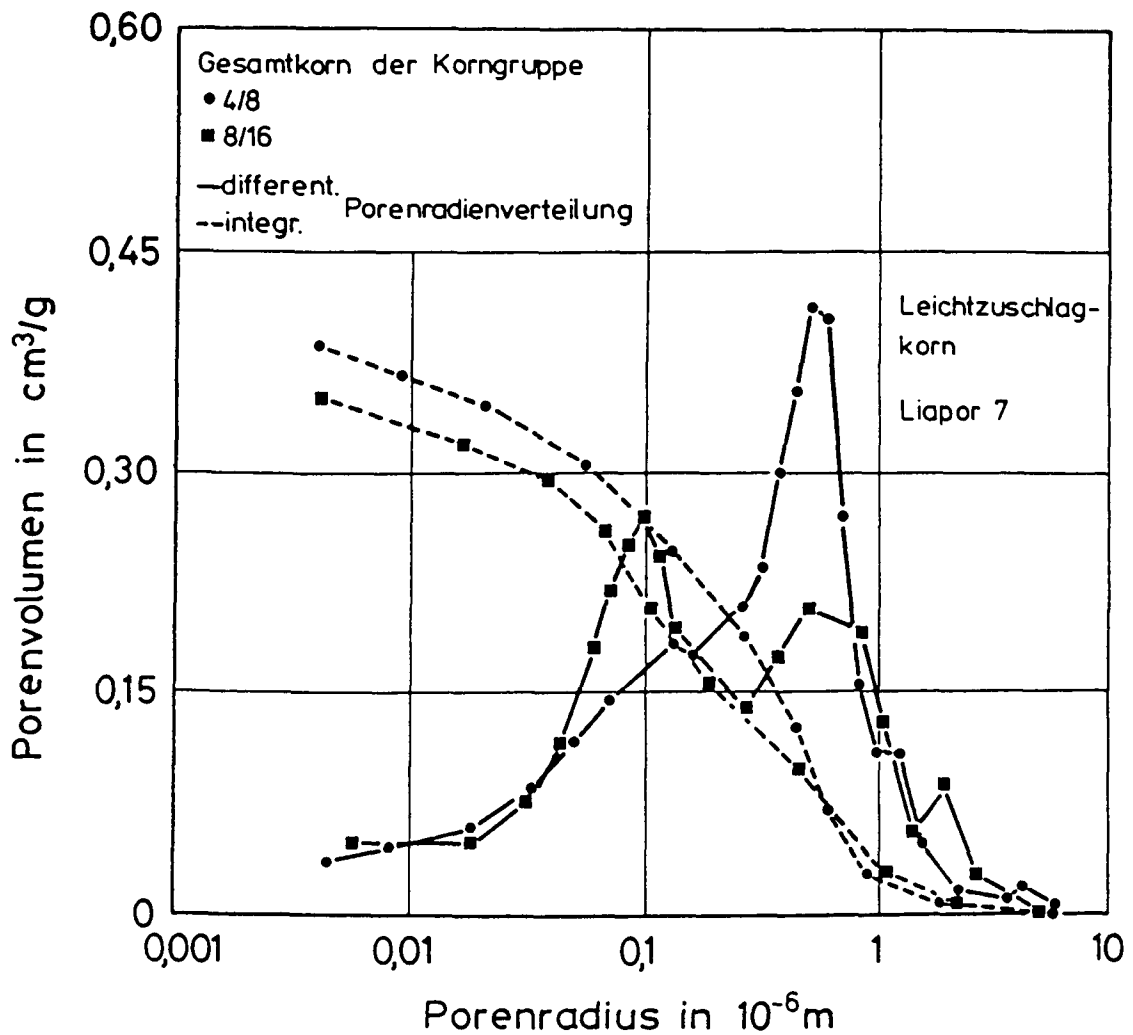


Bild 2: Integrale und differentiale Porenradienverteilung des Gesamtkorns von Leichtzuschlag Liapor 7 der Korngruppen 4/8 und 8/16

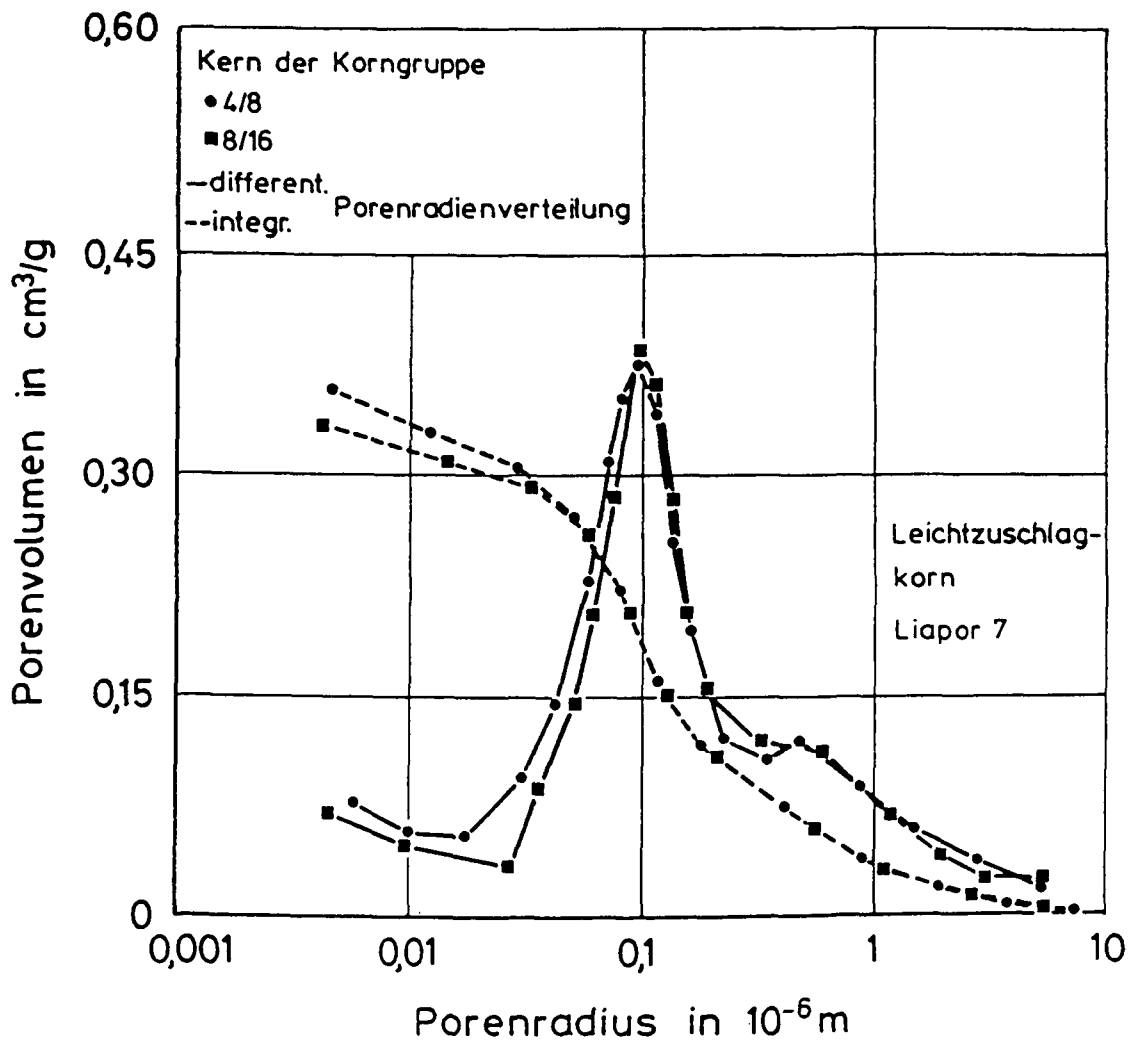


Bild 3: Integrale und differentiale Porenradienverteilung des Zuschlagkerns der Korngruppen 4/8 und 8/16 von Liapor 7

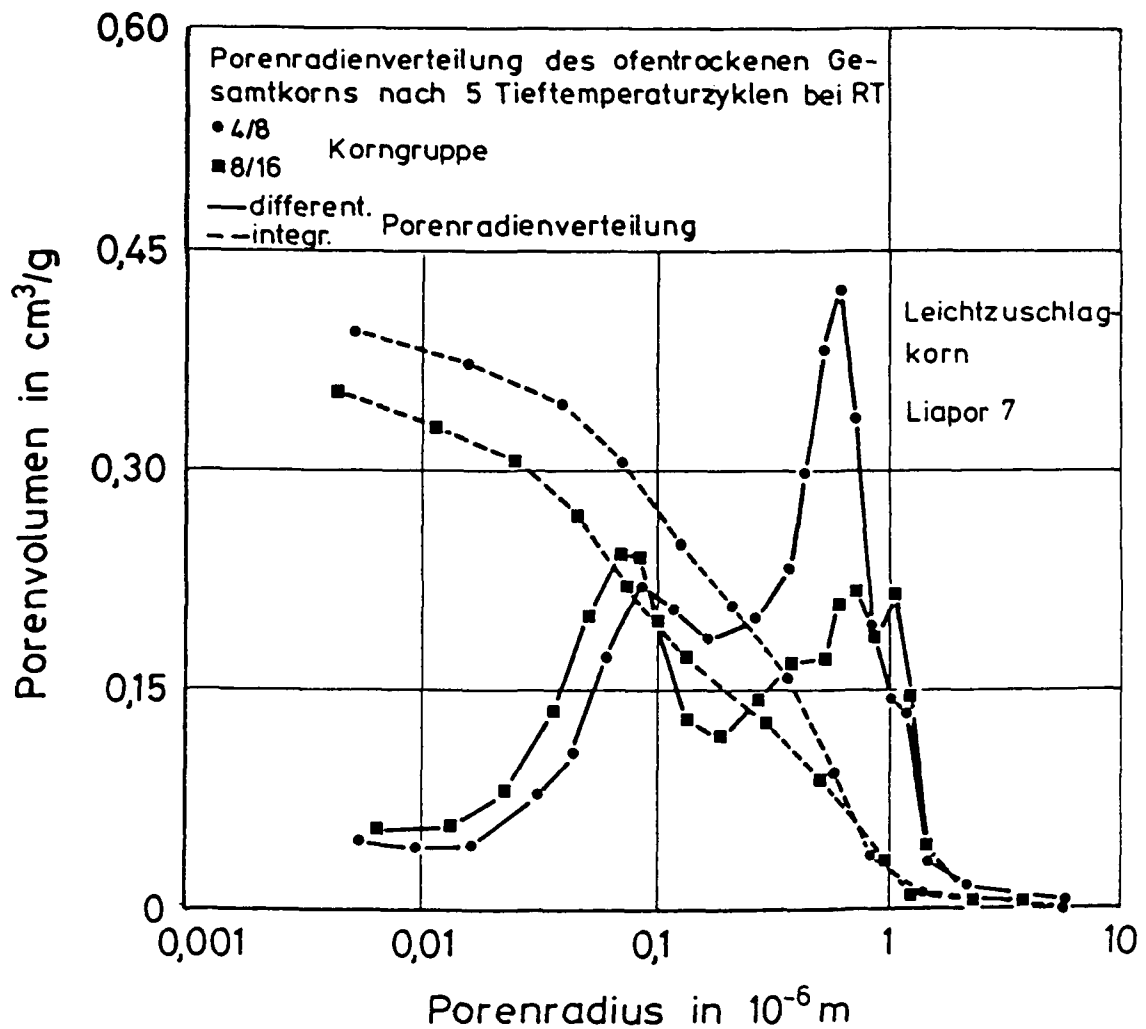


Bild 4: Integrale und differentiale Porenradienverteilung des ofentrockenen Gesamtkorns von Liapor 7 (Korngruppen 4/8, 8/16) nach 5 Tieftemperaturzyklen bei Raumtemperatur

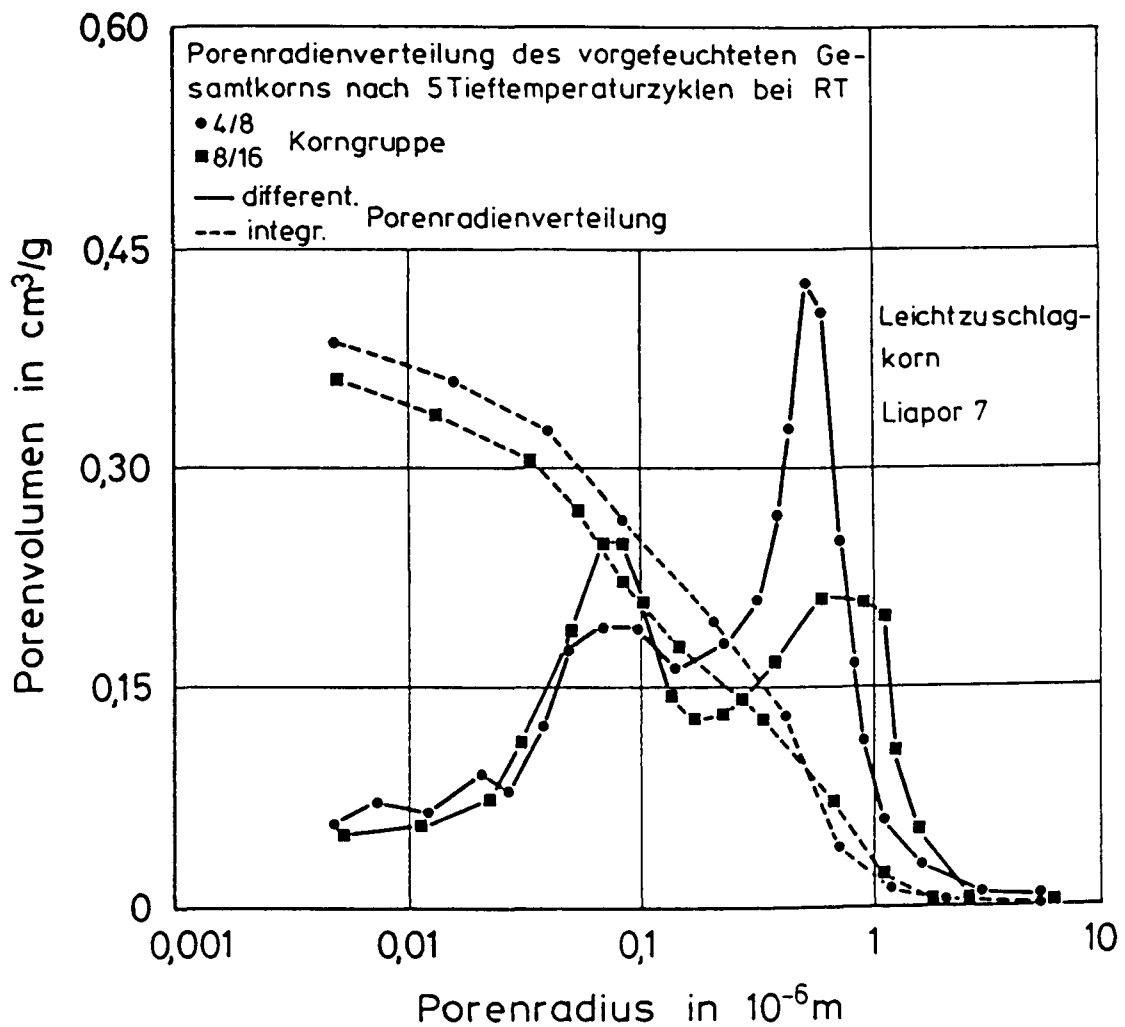


Bild 5: Integrale und differentiale Porenradienverteilung des vorgefeuchteten Gesamtkorns von Liapor 7 (Korngruppen 4/8, 8/16) nach 5 Tieftemperaturzyklen bei Raumtemperatur

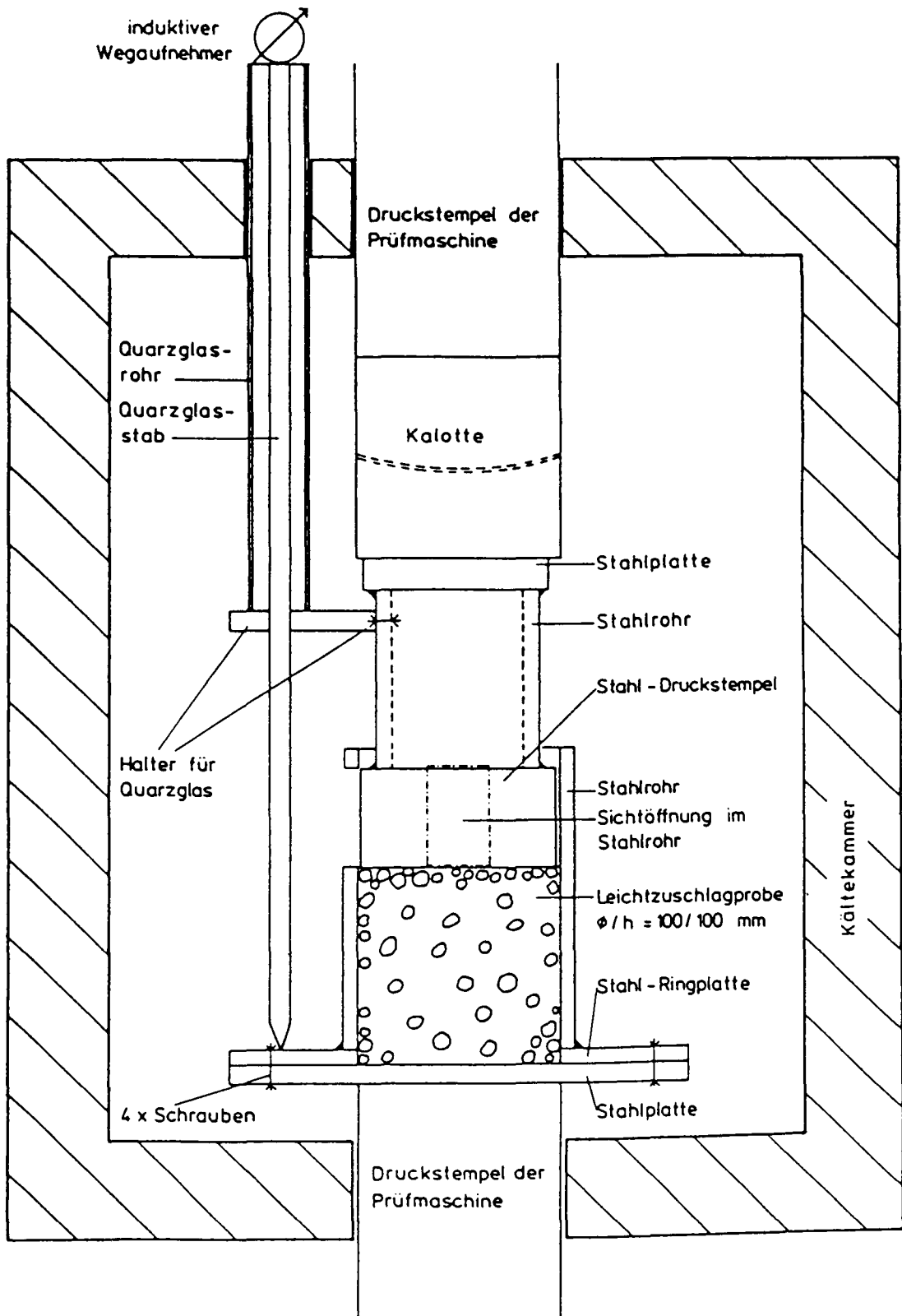


Bild 6: Druckzylinder mit Kältekammer und Instrumentierung zur Prüfung der Zuschlagkornfestigkeit bei tiefen Temperaturen

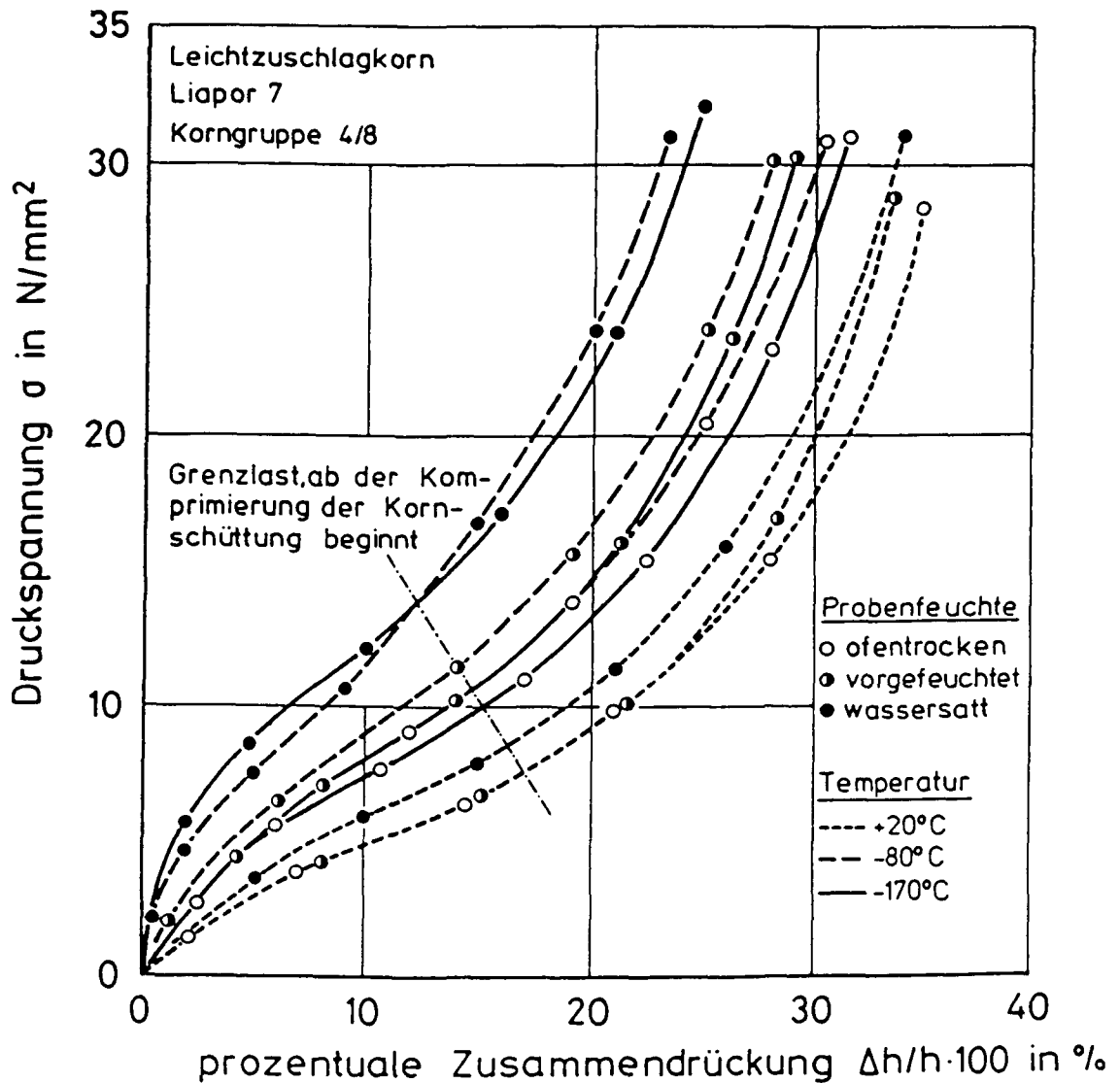


Bild 7: Druckspannung der Leichtzuschlag-Schüttung (Liapor 7, Korngruppe 4/8) in Abhängigkeit von der prozentualen Zusammendrückung, der Kernfeuchte und der Temperatur

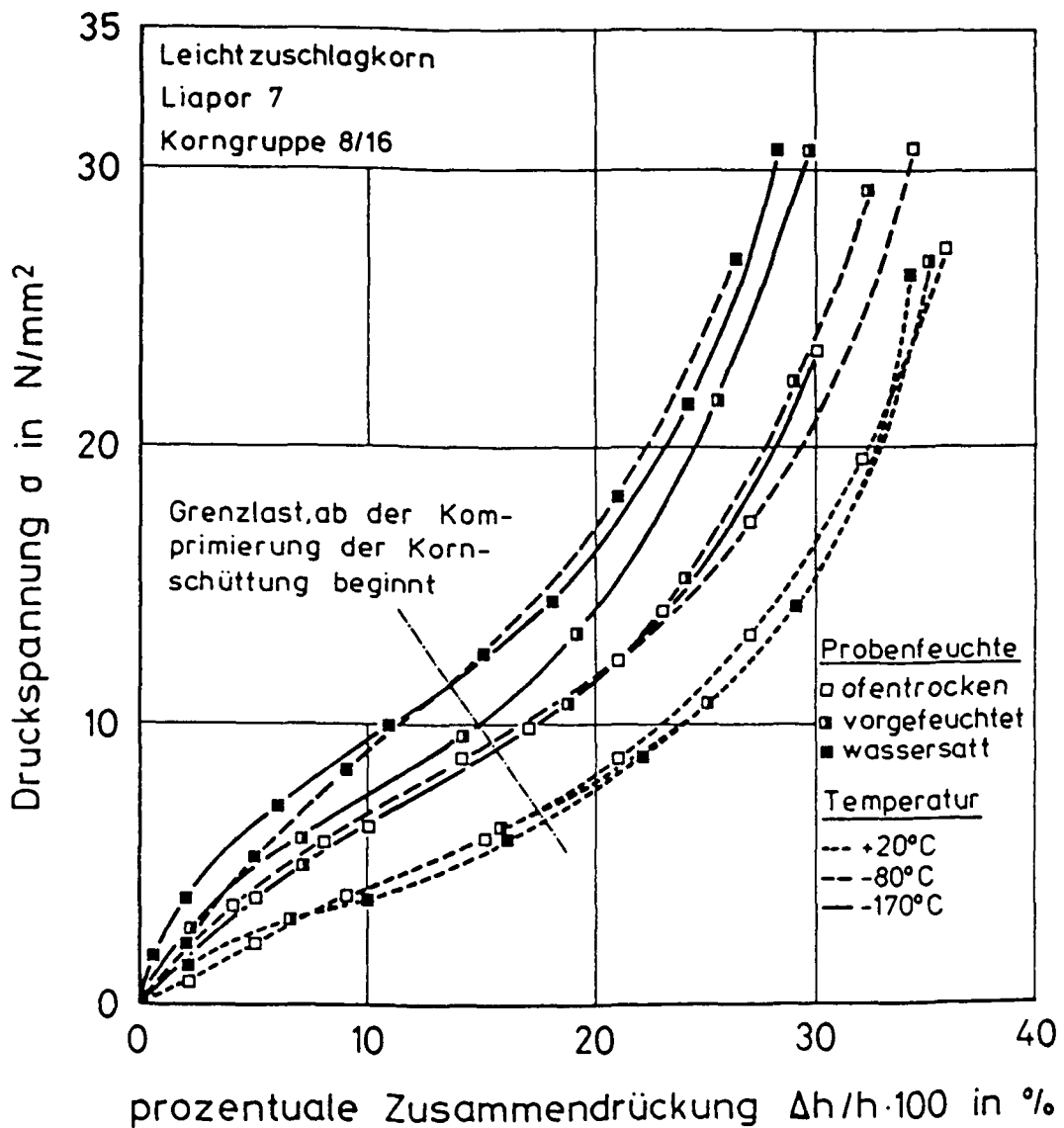


Bild 8: Druckspannung der Leichtzuschlag-Schüttung (Liapor 7, Korngruppe 8/16) in Abhängigkeit von der prozentualen Zusammendrückung, der Kernfeuchte und der Temperatur

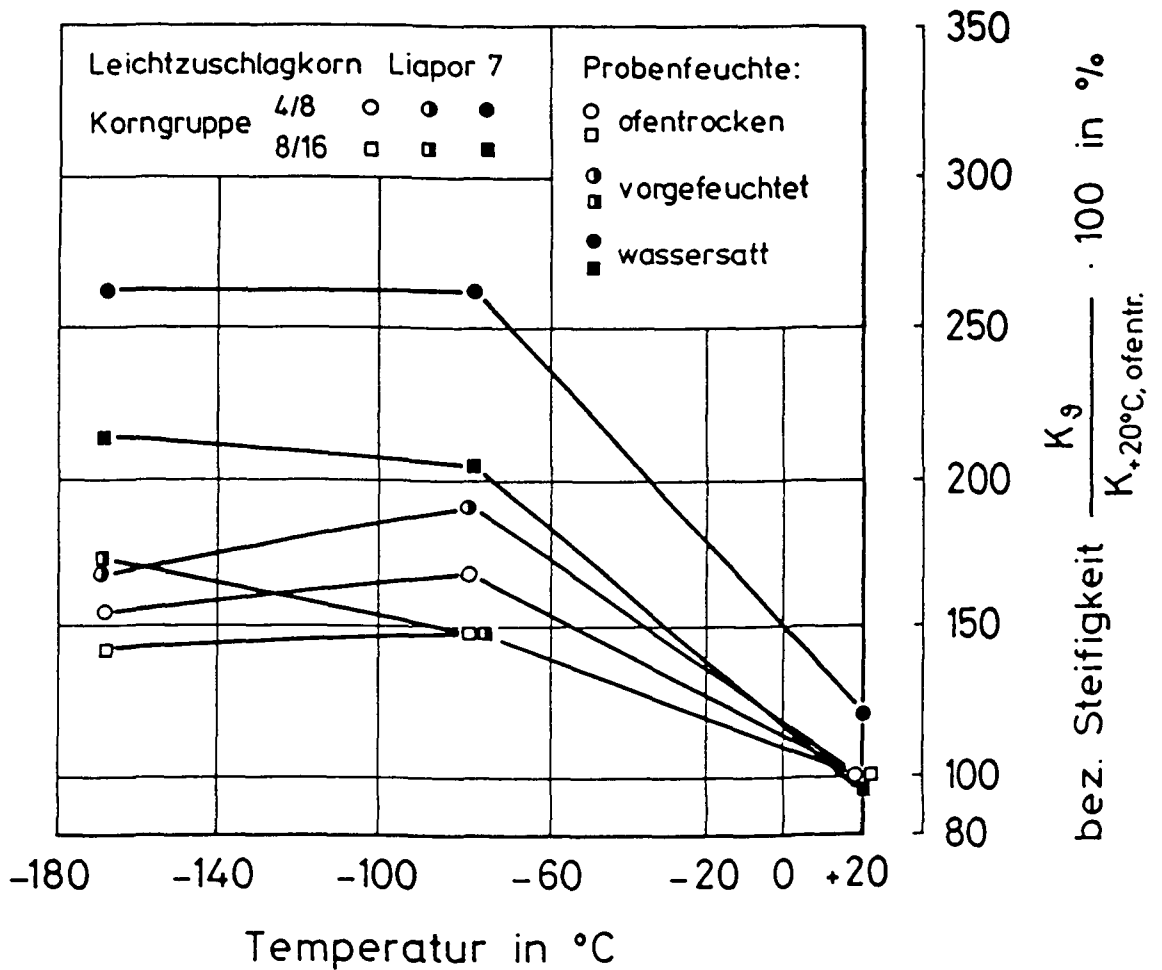


Bild 9: Auf die Steifigkeit bei Raumtemperatur und Ofentrocknung bezogene Zuschlagsteifigkeit von Liapor 7 (Korngruppen 4/8, 8/16) in Abhängigkeit von der Temperatur und der Kernfeuchte

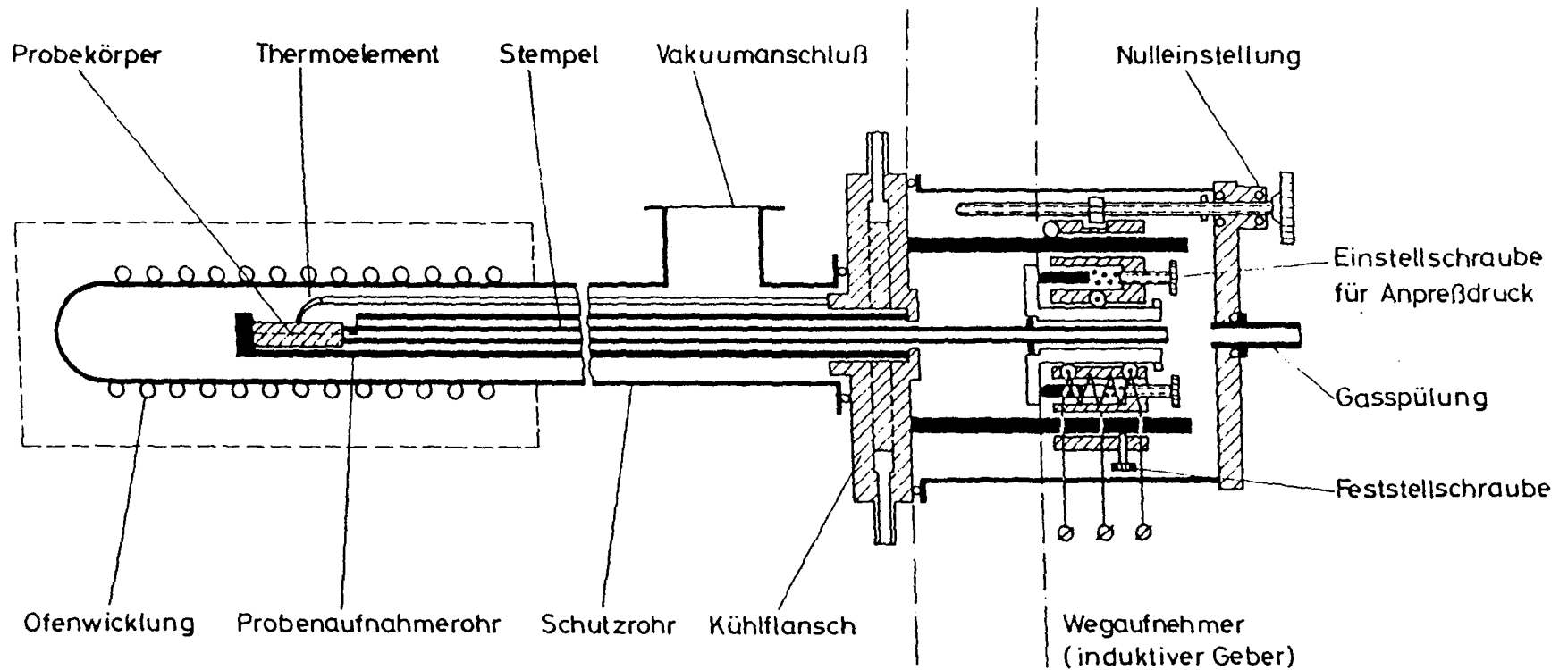


Bild 10: Aufbau des Tieftemperaturdilatometers

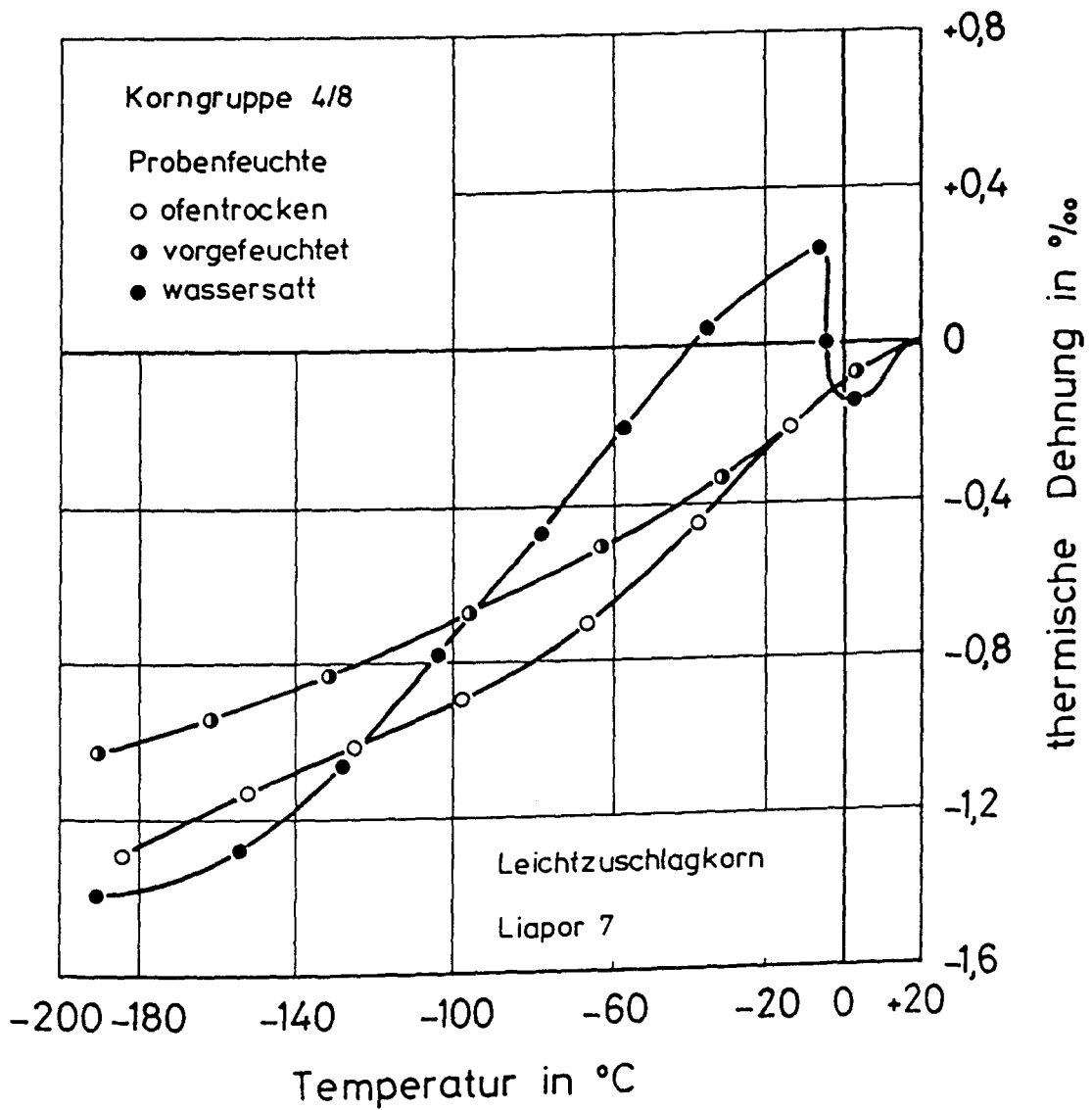


Bild 11: Thermisches Dehnverhalten von Leichtzuschlag Liapor 7 der Korngruppe 4/8 bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlicher Kernfeuchte

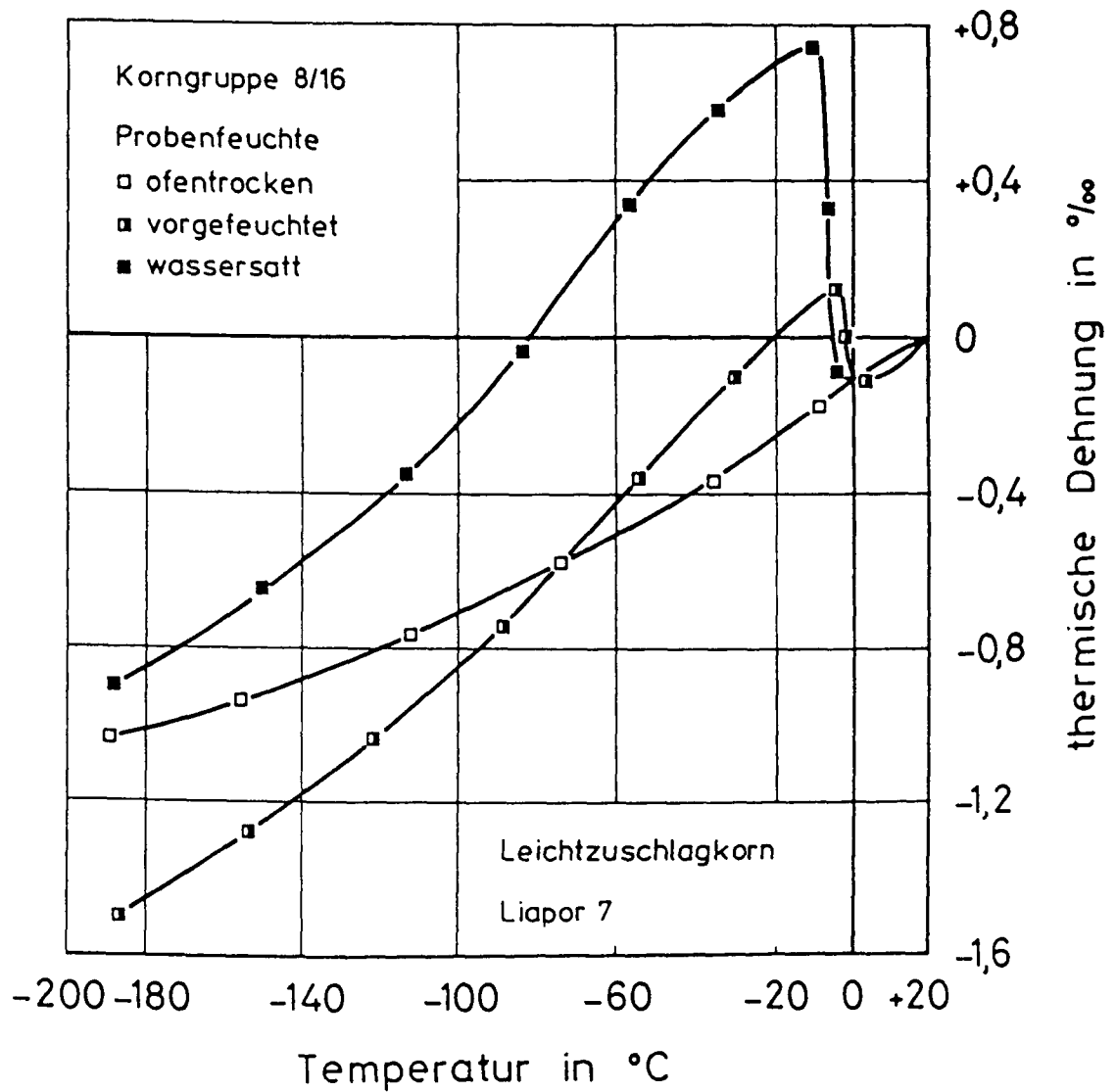


Bild 12: Thermisches Dehnverhalten von Leichtzuschlag Liapor 7 der Korngruppe 8/16 bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlicher Kernfeuchte